

중력렌즈 사건의 측정적 시차효과 검출에 대한 연구
Astrometric Detectability of Parallax
Effect in Gravitational Microlensing Events

한정호

충북대학교 천문우주학과

CHEONGHO HAN

Department of Astronomy & Space Science, Chungbuk National University

Received May 26, 2000; Accepted Jun. 11, 2000

ABSTRACT

The lens mass determined from the photometrically obtained Einstein time scale suffers from large uncertainty due to the lens parameter degeneracy. The uncertainty can be substantially reduced if the mass is determined from the lens proper motion obtained from astrometric measurements of the source image centroid shifts, $\delta\theta_c$, by using high precision interferometers from space-based platform such as the *Space Interferometry Mission* (SIM), and ground-based interferometers soon available on several 8 – 10 m class telescopes. However, for the complete resolution of the lens parameter degeneracy it is required to determine the lens parallax by measuring the parallax-induced deviations in the centroid shifts trajectory, $\Delta\delta\theta_c$. In this paper, we investigate the detectabilities of $\delta\theta_c$ and $\Delta\delta\theta_c$ by determining the distributions of the maximum centroid shifts, $f(\delta\theta_{c,\max})$, and the average maximum deviations, $f(\langle\Delta\delta\theta_{c,\max}\rangle)$, for different types of Galactic microlensing events caused by various masses. From this investigation, we find that as long as source stars are bright enough for astrometric observations it is expected that $\delta\theta_c$ for most events caused by lenses with masses greater than $0.1 M_\odot$ regardless of the event types can be easily detected from observations by using not only the SIM (with a detection threshold $\delta\theta_{\text{th}} \sim 3 \mu\text{as}$) but also the ground-based interferometers (with $\delta\theta_{\text{th}} \sim 30 \mu\text{as}$). However, from ground-based observations, it will be difficult to detect $\Delta\delta\theta_c$ for most Galactic bulge self-lensing events, and the detection will be restricted only for small fractions of disk-bulge and halo-LMC events for which the deviations are relatively large. From observations by using the SIM, on the other hand, detecting $\Delta\delta\theta_c$ will be possible for majority of disk and halo events and for a substantial fraction of bulge self-lensing events. For the complete resolution of the lens parameter degeneracy, therefore, SIM observations will be essential.

Keywords: gravitational lensing – interferometers

1. 서론

현재 진행 중인 미시중력렌즈 실험을 통해 은하 내 암흑 물질의 특성파악에 있어 가장 큰 어려움은 렌즈사건의 측광관측을 통해 얻어지는 유일한 관측치인 Einstein 시간치(t_E)가 렌즈 물질의 물리량인 질량(M), 위치(D_{ol}), 횡단속도(v)가 서로 조합된 결과이기 때문에 발생하는 축퇴 문제로 인하여 개개 렌즈의 물리량을 완전하게 규정할 수 없다는 것이다. 이러한 측광관측에 의한 현 중력렌즈 실험의 단점을 보완하기 위해, 최근 지상과 (예를 들어, Keck과 VLT에 설치될 간섭계) 우주에서의 (예를 들어, *Space Interferometry Mission*, SIM) 고해상 간섭기기를 이용한 렌즈사건의 측정 후속관측이 심도있게 논의되고 있다 (A. Gould 1999, 개인적 교류).

렌즈사건을 고해상 간섭기기를 사용하여 측정관측할 경우 렌즈현상에 의한 광원 광중심의 이동을 측정할 수 있다 (Miyamoto & Yoshii 1995; Høg, Novikov, & Polarev 1995; Walker 1995). 미시중력렌즈현상에 의한 광원 광중심의 이동벡터는 렌즈현상을 겪기 이전의 광원 위치를 기준으로 하여 렌즈-광원 간의 분리벡터인 \mathbf{u} 와

$$\delta\theta_c = \frac{u}{u^2 + 2} \theta_E, \quad (1)$$

$$u_x = \frac{t - t_0}{t_E}, \quad u_y = u_{\min} \quad (2)$$

의 관계로 나타내어진다. 여기서 u_x 와 u_y 는 각각 광원을 기준으로 한 렌즈 고유운동 벡터($\boldsymbol{\mu}$)에 평행이고 수직인 \mathbf{u} 의

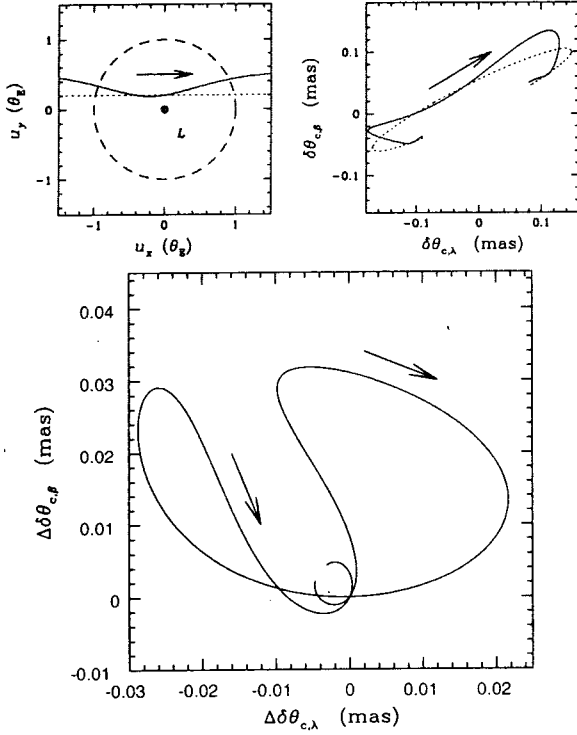


그림 1: 시차효과에 의해 광원 광중심 이동궤적이 변형된 LMC사건의 예. 윗 패넬들은 시차효과의 영향을 겪었을 경우(실선으로 표시)와 그렇지 않았을 경우(점선으로 표시)에서 기대되는 렌즈(L)를 기준으로 한 광원의 이동 경로(왼쪽 패넬)와 이로 인해 변형된 광중심의 이동궤적(오른쪽 패넬)을 보여준다. 광중심 이동궤적은 렌즈현상을 겪기 이전의 광원 위치를 기준으로 하였다. 그리고 아래 패넬은 변형벡터($\Delta\delta\theta_c$)를 나타낸다.

성분을 나타낸다. 그리고 t_0 와 u_{\min} 은 각각 렌즈-광원 간의 최소근접 시간과 이 시점에서의 간격(즉 충돌지수)을 나타낸다. 렌즈사건 중 광중심은 타원의 궤적을 따라 이동하는 데, 이 궤적의 크기(장반경)는 렌즈 Einstein ring의 각반경(θ_E)에 직접적으로 비례하므로, 광중심 이동궤적을 측정함으로써 θ_E 를 구할 수 있다. 렌즈의 고유운동량은 Einstein ring 각반경에 $\mu = \theta_E/t_E$ 로 관계되므로, θ_E 를 구함으로써 광도곡선으로부터 얻어진 t_E 와 더불어 μ 를 결정할 수 있다. 렌즈의 고유운동량은 Einstein 시간치와는 달리 횡단속도에 관계하지 않으므로 렌즈 질량을 상대적으로 작은 오차로 결정할 수 있게 해준다. 하지만 μ 를 측정한다 하더라도 렌즈 물리량의 축퇴문제가 완전히 해결되는 것은 아니다.

광원 광중심의 이동궤적은 렌즈사건 중 발생한 지구 궤도운동에 의한 관측자의 위치이동으로 인해 타원 궤적으로부터 변형된다(시차효과). 그리고 이 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 변형을 검출함으로써 렌즈의 고유운동량과 더불어 렌즈 물리량의 축퇴문제를 완전히 해결할

수 있게하는 렌즈 시차를 결정할 수 있다 (Paczynski 1998; Boden, Shao, & Van Buren 1998; Gould & Salim, 1999; Han & Kim 2000). 하지만 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 변형($\Delta\delta\theta_c$)은 일반적으로 $\delta\theta_c$ 보다는 작기 때문에 보다 정밀한 관측이 요구된다.

본 논문에서는 여러 유형의 다양한 질량에 의해 발생한 렌즈사건에서 기대되는 최대 광중심 이동량($\delta\theta_{c,\max}$)과 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 평균 최대변형량($\langle\Delta\delta\theta_{c,\max}\rangle$)의 분포를 통계적으로 산출하였다. 그리고 이 분포의 분석을 통하여 현재 거론되고 있는 지상 및 우주에서의 관측기기를 사용하여 관측하였을 때 이들 값을 얼마나 잘 측정할 수 있는가에 대해 알아본다.

2. 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 변형

지구 궤도운동으로 인하여 황도좌표계 상에서의 렌즈의 위치는

$$\Delta\varphi_\lambda = \Pi \sin(\lambda_\odot - \lambda), \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_\beta = -\Pi \sin\beta \cos(\lambda_\odot - \lambda) \quad (4)$$

만큼 변형되게 된다 (Smart 1962). 여기서 $\Pi = 1 \text{ AU}/D_{ol}$ 은 렌즈의 시차를, λ 와 β 는 사건이 발생한 지역으로의 황경과 황위를, 그리고 λ_\odot 는 렌즈사건이 진행되는 동안의 태양 황경을 나타낸다. 따라서 렌즈 위치의 이동에 의한 (황도면을 기준으로한) Einstein ring 각반경으로 표준화된 광원의 위치는

$$\Delta u_x = \left(\frac{\Delta\varphi_\lambda}{\theta_E} \cos\phi + \frac{\Delta\varphi_\beta}{\theta_E} \sin\phi \right) \left(\frac{D_{os} - D_{ol}}{D_{os}} \right), \quad (5)$$

$$\Delta u_y = \left(-\frac{\Delta\varphi_\lambda}{\theta_E} \sin\phi + \frac{\Delta\varphi_\beta}{\theta_E} \cos\phi \right) \left(\frac{D_{os} - D_{ol}}{D_{os}} \right) \quad (6)$$

만큼 변형되게 된다. 여기서 $(D_{os} - D_{ol})/D_{os}$ 는 렌즈의 시차에 의한 위치 이동이 광원면에 투영되었을 때의 변형량을 고려하기 위한 요소이고, ϕ 는 황도면과 렌즈 고유운동 방향사이의 각을 나타낸다. 그러면 시차효과에 의해 변형된 광중심 이동궤적의 변형벡터는 식 (3) - (6)으로부터

$$\Delta\delta\theta_c = \delta\theta_c(u + \Delta u) - \delta\theta_c(u) \quad (7)$$

의 관계식으로 구해진다.

그림 1은 은하 헤일로에 위치한 렌즈에 의해 대마젤란 성운(Large Magellanic Cloud, LMC) 방향으로 발생한 렌즈사건에 대해 시차효과에 의해 변형된 광원 광중심 이동궤적의 예를 보여준다. 렌즈의 물리 지수는 $D_{ol} = 10 \text{ kpc}$, $D_{os} = 50 \text{ kpc}$ 과 $M = 0.5 M_\odot$ 으로, 렌즈 지수는 $t_E = 100 \text{ days}$ 와 $u_{\min} = 0.2$ 로 가정하였다. 그리고 사건의 최대 증폭 시 광원은 태양과 가장 멀리 떨어져 있다고 가정하였다(즉 $\lambda_\odot - \lambda = 180^\circ$). LMC에 존재하는 별들의 황위는 $\beta \sim \text{Sin}^{-1}(-0.99)$ 이다. 그림의 윗 패넬들은 시차효과의 영향을 겪었을 경우(실선으로 표시)와 그렇지 않았

을 경우(점선으로 표시)에서 기대되는 렌즈(L)를 기준으로 한 광원의 이동 경로(왼쪽 패널)와 이로 인해 변형된 광중심의 이동궤적(오른 쪽 패널)을 나타낸다. 광중심 이동궤적은 렌즈현상을 겪기 이전의 광원 위치를 기준으로 하여 $-5t_E \leq t_{\text{obs}} \leq 5t_E$ 동안의 궤적을 나타내었다. 그리고 아래 패널은 변형벡터 $\Delta\delta\theta_c$ 를 나타낸다. $\delta\theta_c$ 과 $\Delta\delta\theta_c$ 은 황도좌표계에서 나타내었다.

3. 광원 광중심 이동의 검출

현재 논의되고 있는 지상과 우주에서의 고해상 측성관측을 위한 간섭기기를 사용하여 렌즈사건을 관측할 경우, 광원이 측성 관측한계 이상 밝은 한¹ 대부분 사건에 대하여 렌즈현상에 의한 광중심 이동을 검출할 수 있다. 현재 중력렌즈 실험이 수행되고 있는 은하 중심 팽대부와 LMC 방향으로 검출 예상되는 렌즈사건에 대하여 광중심 이동의 검출확률을 산정하기 위하여, 우리는 다양한 질량에 의해 발생한 여러 유형의 렌즈사건에서 기대되는 $\delta\theta_{c,\text{max}}$ 의 분포를 은하 내 물질의 물리적·역학적 분포의 모델을 이용하여

$$f(\delta\theta_{c,\text{max}}) = \int_0^\infty dD_{os}\rho(D_{os}) \int_0^{D_{os}} dD_{ol}\rho(D_{ol})\pi r_E^2 \times \int_0^\infty \int_0^\infty dv_y dv_z v f(v_y, v_z) \times \delta[\delta\theta_{c,\text{max}} - \theta_E(D_{ol}, D_{os}, M)/\sqrt{8}] \quad (8)$$

과 같이 계산하였다. 여기서 $\rho(D_{os})$ 와 $\rho(D_{ol})$ 은 광원과 렌즈의 시선방향 밀도분포를, v 와 $f(v)$ 는 횡단속도와 분포를 나타내고, δ 는 dirac delta 함수를, 그리고 $r_E = D_{ol}\theta_E$ 를 나타낸다. 위 식에서 πr_E^2 와 v 는 렌즈-광원 간의 접근을 횡단면적(cross-section)과 횡단속도로 비중치를 주기 위하여 포함되었다.² 광중심 이동량은 $u = \sqrt{2}$ 일때

$$\delta\theta_{c,\text{max}} = \frac{\theta_E}{\sqrt{8}} \quad (9)$$

의 최대값을 가진다. 은하 원반 및 중앙 팽대부 내 광원 및 렌즈 물질의 물리적·역학적 분포는 Han & Gould (1995)의 모델을 적용하였다. 헤일로에 존재하는 물질은 core 반경을 가진 isothermal sphere 모델로서

$$\rho(r) = 7.9 \times 10^{-3} \frac{r_c^2 + R_0^2}{r_c^2 + r^2} M_\odot \text{ pc}^{-3}, \quad (10)$$

의 형태로 나타 내어진다. 그리고 적용된 속도분산과 core 반경의 값은 각각 $\sigma = 250/\sqrt{2} \text{ km s}^{-1}$ 이고 $r_c = 2 \text{ kpc}$ 이다.

¹ 중력렌즈사건의 관측은 광원의 밝기에 의해서 제한 받게된다. 검출한계가 $V \sim 20 \text{ mag}$ 인 SIM을 사용한 관측의 경우, 거리가 가까운 은하중심 팽대부 방향으로 검출된 사건의 대부분은 관측이 가능하지만, LMC 사건의 반 이상은 광원이 어두워 관측할 수 없게된다 (Han & Chang 1999). 하지만 이 논문에서는 광원의 밝기가 밝아 관측 가능한 렌즈사건에 대해서만 후속관측을 수행한다는 가정 하에서 밝은 렌즈사건에 국한하여 논의한다.

² 횡단면적(즉 r_E)이 클수록, 또한 횡단속도가 빠를수록 더 많은 사건이 기대된다.

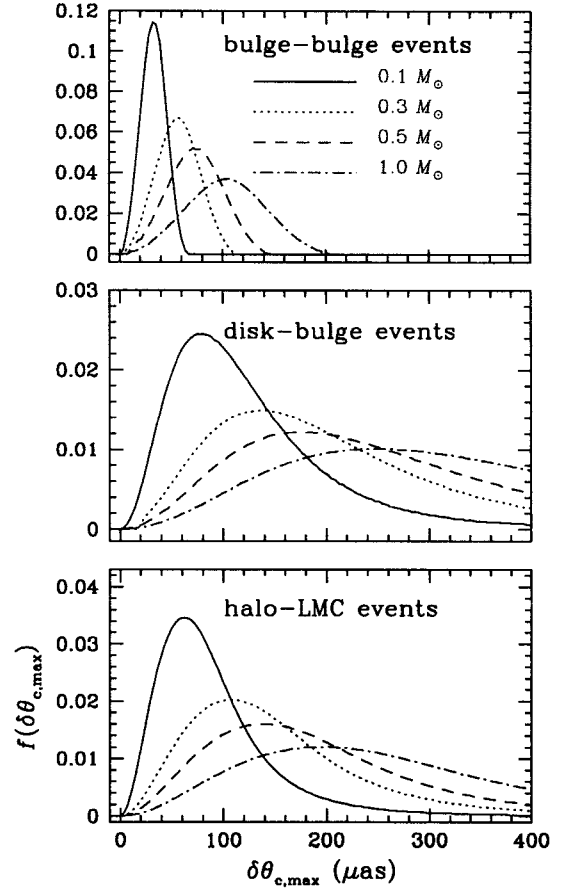


그림 2: 다양한 질량에 의해 발생한 여러 유형의 렌즈사건에서 기대되는 최대 광중심 이동량 $\delta\theta_{c,\text{max}}$ 의 분포. 분포 계산의 상세한 내용은 § 3 참조.

그림 2는 계산을 통해 구해진 $\delta\theta_{c,\text{max}}$ 의 분포를 보여준다. 각 사건 유형의 명명은 렌즈와 광원의 위치 순으로 나열하여 나타내었다. 예를 들어 팽대부-팽대부 사건은 은하 중심 팽대부에 위치한 렌즈에 의해 배경의 팽대부에 위치한 광원에 발생한 렌즈사건을 의미한다. SIM의 경우 측정한계가 $\sim 3 \mu\text{as}$ 임을 고려해 볼 때 (Unwin, Boden, & Shao 1997), 가장 작은 $\delta\theta_{c,\text{max}}$ 가 예상되는 팽대부 자체 사건일 경우라도 $0.1 M_\odot$ 에 이르는 작은 질량의 렌즈에 의해 발생한 사건에서 예상되는 최대 광중심 이동량이 $\delta\theta_{c,\text{max}} \sim 35 \mu\text{as}$ 이나 되므로 쉽게 검출할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, 측정한계가 상대적으로 큰 ($\sim 30 \mu\text{as}$ 정도인) VLT와 Keck에 장착될 간섭기기(Colavita et al. 1998)를 사용하여 렌즈사건을 관측할 경우에도, 질량이 매우 작은($M \lesssim 0.1 M_\odot$) 렌즈에 의해 발생한 사건을 제외한 대부분 사건에 대하여 광중심 이동을 잘 검출할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 시차 효과에 의한 광중심 이동궤적 변형의 검출

전 장에서 우리는 렌즈현상에 의한 광중심 이동은 SIM을 이용한 우주에서의 관측 뿐만 아니라 지상 대형 망원경의

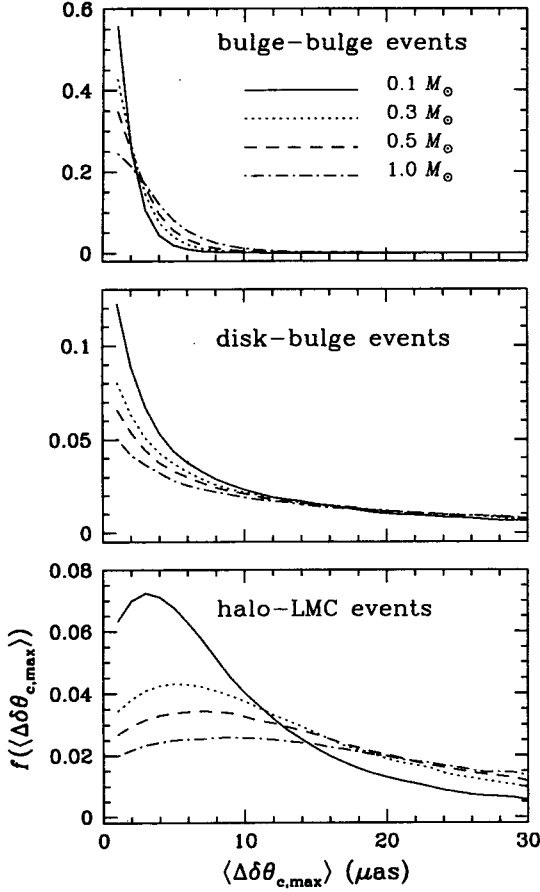


그림 3: 다양한 질량을 가진 렌즈에 의해 발생한 여러 유형의 중력렌즈사건에서 기대되는 시차에 의한 광중심 이동궤적의 평균 최대변형량의 분포. 분포 계산의 상세한 내용은 § 4 참조.

간접기기를 사용한 관측을 통해서도 잘 검출할 수 있음을 보였다. 하지만 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 변형 $\Delta\delta_{\text{c,max}}$ 은 일반적으로 렌즈 현상만에 의한 광중심 이동 δ_{c} 보다 매우 작으므로 보다 높은 정밀도를 가진 관측이 요구된다. 그러면 자연스럽게 발생하는 질문은 “과연 얼마나 많은 렌즈사건에 대하여 $\Delta\delta_{\text{c,max}}$ 까지도 검출하여 렌즈 물리량을 완전히 규정할 수 있을까?”라는 질문일 것이다. 본 장에서는 이 질문에 대한 답을 제공한다.

위의 질문에 답하기 위하여 우리는 여러 유형의 다양한 질량에 의해 발생한 렌즈사건에서 기대되는 $\langle\Delta\delta_{\text{c,max}}\rangle$ 의 분포를

$$\begin{aligned}
 f(\langle\Delta\delta_{\text{c,max}}\rangle) &= \int_0^\infty dD_{\text{os}} \rho(D_{\text{os}}) \int_0^{D_{\text{os}}} dD_{\text{ol}} \rho(D_{\text{ol}}) \pi r_{\text{E}}^2 \\
 &\times \int_0^\infty \int_0^\infty dv_y dv_z v f(v_y, v_z) \\
 &\times \delta[\langle\Delta\delta_{\text{c,max}}\rangle - \langle\Delta\delta_{\text{c,max}}\rangle'(\theta_{\text{E}}, \Pi; D_{\text{ol}}, D_{\text{os}}, M)]
 \end{aligned} \quad (11)$$

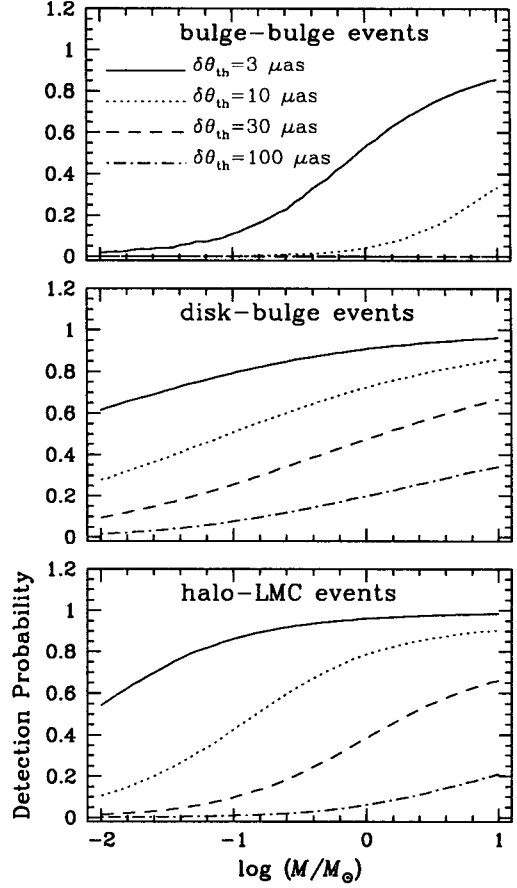


그림 4: 다양한 유형의 렌즈사건에서 기대되는 렌즈 질량에 따른 시차효과에 의한 광원 광중심 이동궤적 변형의 검출확률.

의 계산을 통하여 구하였다. 주어진 렌즈계의 물리량 M , D_{ol} , D_{os} 과 관측자-렌즈-광원 사이의 위치 지수인 $\lambda_{\odot} - \lambda$ 와 ϕ 하에서 기대되는 $\Delta\delta_{\text{c}}$ 의 값은 § 2의 식들을 이용하여 계산하였다. 최대값은 일정 기간동안의 관측을 가정하여 구하였는데, 렌즈사건의 특성 관측은 측광 관측에 의해 검출된 사건에 대해 후속관측의 형태로 진행될 것이므로 $-1.0t_{\text{E}} \leq t_{\text{obs}} \leq 10t_{\text{E}}$ 의 기간 동안 관측하였다고 가정하였다. 그리고 변형량의 평균값은 렌즈-광원 최소접근거리와 μ 와 황도면 사이각이

$$\begin{aligned}
 0 &\leq u_{\text{min}} \leq 1.0, \\
 0 &\leq \phi \leq 2\pi
 \end{aligned} \quad (12)$$

구간에서 임의의 값을 가진다는 가정 하에서 구해진 $\Delta\delta_{\text{c,max}}$ 의 값을 평균함으로써 계산하였다. 광원과 렌즈의 물리적·역학적 분포의 모델은 $\delta_{\text{c,max}}$ 분포의 산정에 사용한 동일한 모델(Han & Gold 1995)를 사용하였다. Baade's window의 황위는 $\beta \sim -6^\circ.5$ 를 사용하였다.

그림 3은 계산을 통해 구해진 $\langle\Delta\delta_{\text{c,max}}\rangle$ 의 분포를 보여준다. 분포는 임의로 표준화 하였음을 밝혀둔다. 그림

표 1: SIM과 지상 대형 망원경의 간섭기기를 사용한 렌즈 사건의 축성 후속관측에서 예상되는 시차효과에 의한 광원 광중심 이동궤적 변형의 검출확률. 적용된 SIM과 지상 대형 망원경의 간섭기기의 검출한계는 각각 $\delta\theta_{th} = 3 \mu\text{as}$ 와 $30 \mu\text{as}$ 이다.

사건 유형	렌즈 질량 (M_{\odot})	검출확률	
		SIM	지상 관측
Bulge	0.1	0.11	0.00
	0.3	0.27	0.00
	0.5	0.37	0.00
	1.0	0.53	0.00
Disk	0.1	0.79	0.26
	0.3	0.86	0.36
	0.5	0.88	0.41
	1.0	0.91	0.47
Halo	0.1	0.86	0.10
	0.3	0.93	0.21
	0.5	0.94	0.28
	1.0	0.96	0.39

4는 주어진 렌즈 질량에 의해 발생한 렌즈사건 중 시차에 의한 광중심 이동궤적의 변형이 일정 검출한계($\delta\theta_{th}$) 이상 되는 사건의 확률분포를 (로그 스케일로 표시된) 질량의 함수로 나타내었다. 그리고 표 4에는 검출한계가 SIM과 지상 대형 망원경의 간섭기기에 해당하는 $\delta\theta_{th} \sim 3 \mu\text{as}$ 와 $\sim 30 \mu\text{as}$ 일 때 시차효과에 의한 검출이 예상되는 확률을 요약해 나타내었다.

그림 3과 4, 그리고 표 1의 분석을 통하여 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 첫째, VLT와 Keck등에 설치될 지상의 간섭기기를 사용하여 팽대부 자체 렌즈사건을 관측할 경우 질량이 $1.0 M_{\odot}$ 에 의해 발생한 사건의 경우에도 검출확률은 1% 미만이므로 거의 대부분의 사건에 대하여 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 변형을 검출하기 어려울 것임을 알 수 있다. 그리고, 상대적으로 변형량이 큰 은하 원반과 헤일로에 존재하는 렌즈에 의해 발생한 사건에 대해서도 변형의 검출은 일부 사건에만 제한된다. 예를 들어, $M = 0.3 M_{\odot}$ 인 렌즈에 의해 발생한 사건의 경우에도 예상되는 변형 검출확률은 각 유형의 사건에 대해 30%와 21%밖에 되지 않음을 알 수 있다. 둘째, 하지만 검출한계가 상대적으로 낮은 SIM을 이용한 관측의 경우, 질량이 $0.1 M_{\odot}$ 이상인 렌즈에 의해 발생한 대부분의 원반 및 헤일로 사건과 상당 수 팽대부 자체사건에 대하여 이동궤적의 변형을 검출할 수 있을 것으로 예상된다. 예를 들어, $M = 0.3 M_{\odot}$ 인 렌즈에 의해 발생한 사건의 경우 예상되는 변형 검출확률은 원반과 헤일로 사건의 경우 80% - 90%이고, 팽대부 자체 사건도 $\sim 30\%$ 에 이를 것으로 예상된다.

5. 결론 및 토의

여러 유형의 다양한 질량에 의해 발생한 렌즈사건에서 기대되는 최대 광중심 이동량과 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 평균 최대변형량 분포의 통계적 산출을 통하여 밝혀진 사실을 요약하면 다음과 같다.

1. 렌즈현상에 의한 광원 광중심 이동은 SIM을 이용한 우주에서의 관측 뿐만 아니라 지상 대형 망원경에 설치될 간섭기기를 사용한 관측을 통해서도 사건의 유형에 관계없이 대부분의 사건에 대해 잘 검출될 수 있을 것이다.
2. 하지만, 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 변형은 지상의 간섭기기를 사용하여 렌즈사건을 관측할 경우, 거의 대부분의 팽대부 자체 사건에 대하여 검출하기 어려울 것이고, 상대적으로 변형량이 큰 은하 원반과 헤일로에 존재하는 렌즈에 의해 발생한 사건에 대해서도 일부 사건에 대해서만 검출이 가능할 것이다.
3. 하지만 검출한계가 상대적으로 낮은 SIM을 이용한 관측의 경우, 질량이 $0.1 M_{\odot}$ 이상인 렌즈에 의해 발생한 대부분의 원반 및 헤일로 사건과 상당 수 팽대부 자체사건에 대하여 이동궤적의 변형을 검출할 수 있을 것으로 예상된다.

따라서, 시차효과에 의한 광중심 이동궤적의 변형을 검출하여 렌즈 물리량을 완전히 결정하기 위해서는 SIM을 이용한 축성 후속관측이 필수적이라 하겠다.

본 연구는 충북대학교 기초과학 연구소의 연구비(CBNU-BSRF-00C02)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

Boden, A. F., Shao, M., & Van Buren, D. 1998, ApJ, 502, 538
 Colavita, M. M. et al. 1998, Proc. SPIE, 3350-31, 776
 Gould, A., & Salim, S. 1999, ApJ, 524, 794
 Han, C., & Chang, K. 1999 MNRAS, 304, 845
 Han, C., & Kim, H.-I. 2000, ApJ, 528, 687
 Han, C., & Gould, A. 1995, ApJ, 447, 53
 Mariotti, J. M., et al. 1998, Proc. SPIE, 3350-33, 800
 Miyamoto, M., & Yoshii, Y. 1995, AJ, 110, 1427
 Høg, E., Novikov, I. D., & Polarev, A. G. 1995, A&A, 294, 287
 Paczyński, B. 1998, ApJ, 494, L23
 Smart, W. M. 1962, Text-Book on Spherical Astronomy (Cambridge: University Press), 219
 Unwin, S., Boden, A., & Shao, M. 1997, in AIP Conf. Proc. 387, Space Technology and Applications International Forum 1997, ed. M. S. El-Genk (New York: AIP), 63
 Walker, M. A. 1995, ApJ, 453, 37